

MINERALOGÍA APLICADA PARA LA PEQUEÑA MINERÍA

Ricardo Castroviejo (ricardoc@minas.upm.es), Edgar Berrezueta
(mjer@mi.madridtel.es)

ETSI Minas de Madrid (Universidad Politécnica de Madrid)
C/ Ríos Rosas, 21. 28003-Madrid (España)
ESPOL (Ecuador)

RESUMEN

La pequeña minería puede beneficiarse de una forma muy directa de los recientes avances en el campo de la mineralogía aplicada y técnicas relacionadas. La definición tipológica y la modelización de yacimientos han alcanzado tal nivel que pueden permitir derivar conclusiones de alcance práctico, para exploración o incluso para la consecución de créditos, con estudios petrológicos y mineralógicos relativamente sencillos y baratos. Igualmente la aplicación rigurosa de técnicas como el análisis digital de imagen a la microscopía de menas metálicas proporciona, con un coste muy limitado, gran cantidad de información que puede ser vital para controlar la eficiencia del proceso mineralúrgico y para la protección ambiental. Las investigaciones en curso en el Laboratorio de Mineralogía Aplicada muestran la utilidad de estos estudios en diversos casos prácticos en Iberoamérica. Un ejemplo puede ser la pequeña minería de Zaruma-Portovelo (Ecuador), con una tradición secular de beneficio de menas polimetálicas y de metales preciosos.

Palabras clave: Análisis Digital de Imagen, Exploración, Mineralogía, Metales Preciosos, Pequeña Minería.

MODELIZACIÓN DE YACIMIENTOS Y EXPLORACIÓN

Introducción

Los variados y rigurosos estudios sobre los diversos aspectos de la Geología de Yacimientos Minerales, posibles gracias al desarrollo de nuevas técnicas con una precisión hasta ahora no imaginada, han hecho posible la sistematización de la información geológica desde todos los puntos de vista: petrológico, mineralógico, tectónico, geoquímico, etc., así como la comparación de los procesos de concentración mineral en los ámbitos más variados (intra-cortical, sub-oceánico, superficial...).

Los conocimientos sistemáticos han desembocado en la modelización de los yacimientos minerales y de su génesis, alcanzándose niveles de información a la vez elevados y generales, a partir de bases de datos que incorporan observaciones de todo el mundo, con un riguroso apoyo empírico.

Estos modelos integran, para cada yacimiento, las distintas observaciones de campo y laboratorio, de tipo mineralógico, petrológico, etc. La ventaja que ofrecen para el prospector minero es que, una vez que se conoce el modelo, basta con algunas determinaciones características para orientar conclusiones prácticas acerca del conjunto, de su valor minero posible o de las tareas ulteriores a realizar para valorarlo. Dichas determinaciones son posibles, con los medios hoy disponibles, sin una inversión excesiva y, por tanto, representan una ayuda eficaz, antes reservada a los grandes consorcios, pero hoy asequible para el pequeño minero.

Como ejemplos, pueden citarse los modelos pórfido cuprífero, epitermal, oro orogénico o sulfuros masivos volcanogénicos, entre otros muchos. Aplicado al caso epitermal, tan frecuente en Iberoamérica, es posible la caracterización de las alteraciones hidrotermales ya sobre el terreno, mediante un difractómetro de campo. Pero incluso si no se dispone de esta técnica, el estudio

petrográfico y mineralógico de unas pocas muestras, apoyado por una información de campo precisa, permite ya una orientación, en una fase temprana, acerca del tipo de concentración, de alta o baja sulfuración (high sulfidation, low sulfidation).

Cuando se popularizó el modelo, a finales de los pasados años ochenta, las grandes compañías tenían dificultad para retener a sus geólogos de exploración. Éstos preferían abandonar las compañías para aplicar sus conocimientos del modelo epitermal en propio beneficio, trabajando por su cuenta. Asumiendo sus propios riesgos, que por el grado de conocimiento ya alcanzado eran limitados, podían vender el producto de su trabajo con un mayor valor añadido: un indicio ya caracterizado, que representa un objetivo más claro para el inversor.

Con un grado algo mayor de sofisticación, pueden aplicarse técnicas como las de petrografía y microtermometría de inclusiones fluidas, que en casos favorables pueden orientar sobre la posición de la zona de ebullición (boiling) en sistemas epitermales y, por tanto, sobre la previsible profundidad de la mineralización.

El pequeño minero, convenientemente asesorado, podría obtener una indudable ventaja de esta situación y revertir en propio beneficio los avances logrados por la investigación internacional, muy significativos para la exploración de recursos minerales.

ESTUDIO POR ANÁLISIS DIGITAL DE IMAGEN

Introducción

La identificación de fases minerales visibles en probetas pulidas mediante un sistema experto y automático representa el complemento perfecto a las técnicas tradicionales de microscopía. Para su consecución, ha sido necesario obtener una óptima y homogénea calidad de pulido en las muestras utilizadas, lograr la puesta a punto del equipo de **Análisis digital de imagen** -ADI- y aplicar un análisis multiespectral sobre la imagen en color (RGB) obtenida en origen.

La técnica de análisis digital de imagen pretende ofrecer un soporte numérico de cuantificación de parámetros geométricos y densitométricos que complementen y/o aporten nuevos datos a los estudios tradicionales de microscopía. El aporte de la técnica de análisis de imagen frente a otros métodos de cuantificación (platina integradora sobre microscopio óptico) es su mayor versatilidad, agilidad, sistemática y potencia, lo que permite aumentar la base de observación y automatizar el tratamiento matemático de los datos, generando resultados más fiables y rápidos.

Para obtener resultados confiables, cada paso del procedimiento de utilizar la técnica de Análisis Digital de Imagen debe ser desarrollado siguiendo una metodología rígida que garantice la reproducibilidad de las medidas y la identificación de las posibles fuentes de error. (Berrezueta, 2002). El análisis de imágenes geométricas como la superficie, el perímetro o la forma de un objeto delimitado dentro de la imagen (Pirard, 2003).

La representatividad estadística de las medidas obtenidas de una imagen o conjunto de imágenes, estará condicionada al cumplimiento de un estricto proceso de muestreo en la selección de la muestra. Esto es, cumplir el requisito de aleatoriedad a fin de que la imagen no represente una infama parte del producto a caracterizar. Es importante además mencionar que una imagen digital es tan solo una representación bidimensional del cuerpo u objeto tridimensional a caracterizar. Según esto, es necesario recurrir a la estereología a fin de poder estimar las propiedades en 3D de las medidas realizadas en 2D.

Objetivo

El objetivo de trabajo es presentar las posibilidades que ofrece la técnica de Análisis digital de imagen como complemento de las técnicas tradicionales de microscopía. Concretamente en la cuantificación automática de parámetros geométricos y densitométricos de fases minerales presentes en probetas pulidas.

Para la consecución de este fin es necesario, en principio, obtener en unas condiciones que garanticen la reproducibilidad de la técnica y, la simplificación del problema a través de un estudio mineralógico previo.

Metodología de Aplicación del ADI

La metodología que se ha seguido en este trabajo, con adaptaciones según sea el objetivo, presenta un esquema habitual desarrollado en investigaciones de este tipo. Así: Una primera etapa de recopilación de información y de elección de las herramientas y técnicas de análisis, posteriormente se analizan los datos y contrastan las hipótesis de trabajo, finalmente se obtienen los resultados que han de ser verificados y validados antes de extraer las conclusiones finales. En términos específicos de la aplicación del ADI se siguen los siguientes pasos.

1. Obtención de una óptima calidad de pulido en las probetas mediante un control de calidad que garantice la reproducibilidad, por el acabado homogéneo de todas las preparaciones.
2. Puesta a punto del equipo mediante control de derivas temporales y espaciales, ruidos. (Muzquiz, C. 1998; Berrezueta, E. 2000; Coz, E. 2002 y Castroviejo, R. 2002).
3. Adquisición de imágenes con garantía de reproducibilidad (Castroviejo, R. 1999 y Coz, E. 2002 y Castroviejo, R. 2002).
4. Análisis y Tratamiento de las imágenes en color (RGB) mediante análisis multispectral, es decir, trabajando en cada una de las bandas de forma individual (Berrezueta, E. 2002).
5. Presentación, análisis y valoración crítica preliminares de los resultados.

El equipo de trabajo utilizado está compuesto por un Microscopio óptico *Leica* DMRXP (trabajando en aire, con luz reflejada y objetivo 20x de óptica plana corregida) y Analizador de Imagen y software *Leica Aphelion*, instalados en el Laboratorio de Análisis de Imagen del Deptº. de Ingeniería Geológica, ETS Ing. Minas, Universidad Politécnica de Madrid (Figura 3, Berrezueta, 2000).

Análisis Modal, Ponderal y Morfológico.

La medida de los valores de superficie que ocupan las fases o componentes de la escena es lo que se conoce como análisis modal. Es demostrable que la suma de los *pixels* correspondientes a una fase se aproxima a su área real. Esta aproximación estará condicionada al aumento que se utilice, es decir, a la proporción de área que puede ser representada por un *píxel*.

La dependencia del rango de escala de observación en las medidas es una circunstancia habitual en geoestadística. La solución a este problema radicará en integrar en un mismo proceso geoestadístico, solo aquellas medidas que provengan de escalas similares. El cálculo de valores volumétricos a partir de las proporciones de superficie encontrados, estará basado en el principio fundamental de la estereología que sostiene que: Bajo condiciones de aleatoriedad en la selección de la muestra, la proporción de *pixels* dentro de la imagen es un estimador no sesgado de la proporción volumétrica. (Russ, 1997).

Además del cálculo de medidas de superficie, es posible obtener medidas extremadamente precisas como perímetro, diámetro, etc., lo que permite reagrupar la información en histogramas y curvas granulométricas o morfométricas. La versatilidad de los datos numéricos obtenidos permite la libertad de selección de los modelos de representación (gráficos y curvas) y los parámetros a representar, todo ello en función del objetivo de la aplicación.

La medida de los diámetros (*breadth*, *length*, etc) permiten el acceso a la obtención de datos morfológicos de las fases, es decir, la cuantificación del alargamiento o aplastamiento, tendencia a orientarse y medidas esfericidad o no (Pirard, 2003). La posibilidad de determinar la relación existente entre fases presentes en una escena, es decir, conocer si una fase incluye otra, comparten un borde común o son independientes entre sí. Esto es lo que se conoce como análisis de liberación y habitualmente es desarrollado mediante el cálculo del área de las fases estudiadas o por el cálculo del perímetro común ellas.

Aplicación del ADI al proceso Mineralúrgico

En todo proceso mineralúrgico es fundamental poder conocer los tamaños de grano del mineral a separar, su distribución y asociaciones para poder determinar el tamaño de la molienda más adecuado para dicha mena, de forma que se garantice un grado de liberación óptimo. Esto es, que el grado de liberación no sea muy bajo, lo que llevaría la pérdida del mineral a separar en los estériles, ni muy alto, ya que provocaría un costo mayor en la molienda y probablemente un abundancia de ultrafinos que darían más problemas de recuperación (Pantoja, 1999). Con el fin de representar de forma practica estas aplicaciones al proceso mineralúrgico, han sido tomados ejemplos de aplicaciones realizadas por nuestro equipo anteriormente.

Un ejemplo claro fue el obtenido de la investigación realizada sobre unas menas de Nariño-Colombia (Betas Bruja y Gruesa) con riqueza y granulometría ideales para un ensayo modelo. Para esta aplicación se descarto los problemas de representatividad de las medidas a escala de muestra (probeta pulida), puesto que se ha estudiado siempre la superficie entera de cada sección. No obstante, a escala de yacimiento no se han hecho todavía campañas sistemáticas de evaluación –se trata únicamente de minería de rapiña, informal-, por lo que los resultados obtenidos pueden considerarse únicamente orientativos a dicha escala.

El detalle de la aplicación del ADI en estas menas (Berrezueta *et al*, 2002) y la valoración del método (Castroviejo *et al*, (2002) ha sido presentada en sendos trabajos que han sido publicados en revistas internacionales de prestigio científico. Siguiendo el orden seguido en la descripción de los tipos de análisis factibles de aplicar tenemos lo siguiente:

➤ Área de fases de interés

De las imágenes obtenidas fueron segmentadas las áreas de tres grupos de fases que se consideraron relevantes, sus valores en área son los siguientes:

FASES	Área (μm^2)	
	V. Bruja	V. Gruesa
Oro nativo / <i>electrum</i> .	135709	42733
Ganga (Carbonatos y Cuarzo)	6892487	3376876
Sulfuros y sulfosales.	3572648	3614687

De estos medidas y utilizando el criterio de que el $\%A \approx \%V$ (Russ, 1990) y los valores de densidad media de los grupos, ha sido posible determinar el valor de contenido de Oro nativo / *electrum*. La correlación de los datos encontrados con los encontrados a través de métodos químicos se presenta a continuación:

Método de Determinación	Análisis Químicos			
	M. Óptico			
	Au Nativo <i>electrum</i>	Au	Ag	Au + Ag
Veta Bruja	685	318	180	498
Veta Gruesa	230	44	151	195

➤ **Número de granos y tamaño de Oro**

Cada una de las fases de Oro Nativo / electrum ha sido cuantificada y numeradas con el fin de elaborar una curva de distribución de frecuencia de granos en función del tamaño de fases. Los parámetros seleccionados para representar el tamaño ha sido la anchura ("breadth", mínimo valor entre dos tangentes paralelas, figura 1.) y longitud ("length", máximo valor entre dos tangentes paralelas) aplicados a la totalidad de los granos de oro visibles en la sección pulida. A partir de estos datos se generó una función de relación entre área-anchura (Figura 2).

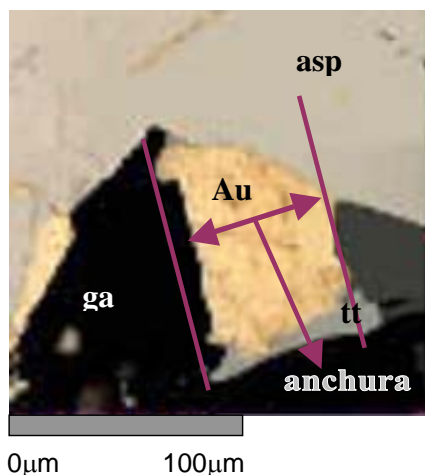


Figura 1. Representación de la anchura de un grano de oro.

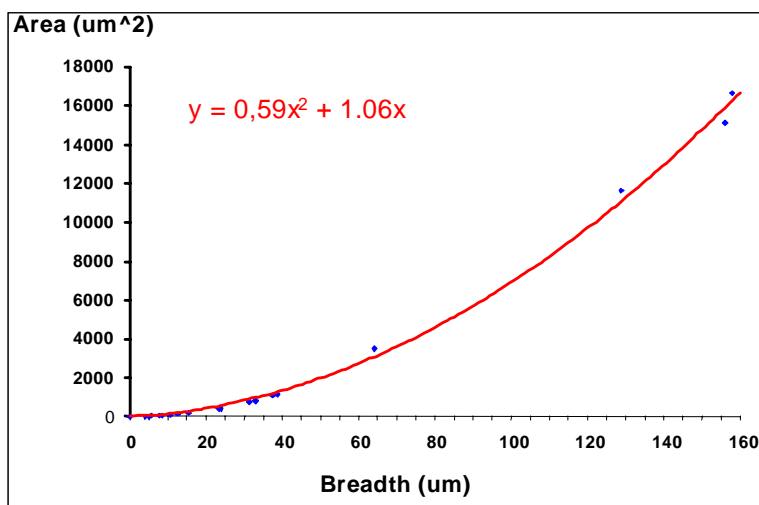


Figura 2. Curva de relación entre área - anchura.

El número de granos detectados con esta técnica (Figuras 3 y 4) depende de:

- ◆ Los estrictamente intersectados por la superficie pulida de la probeta, únicos visibles.
- ◆ La resolución del microscopio, determinada a su vez por la configuración elegida: se ha utilizado un objetivo de 20 X, en aire, que ofrece óptimo rendimiento, pero no garantiza la detección de granos ultrafinos, por lo que el tramo granulométrico inferior (0-7µm) puede estar infra-representado.
- ◆ La identidad de los portadores de oro: sólo se detecta oro visible (esencialmente oro nativo) y no el contenido químicamente en otras fases; las aleaciones (Au-Ag, electrum, amalgama, etc.) se computan, en principio, como oro.

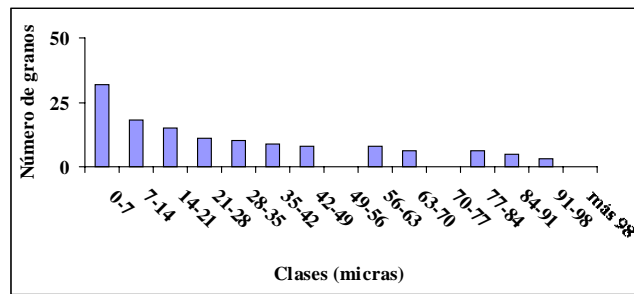


Figura 3. Frecuencia de granos de oro clasificados por rangos de tamaños. Veta Gruesa

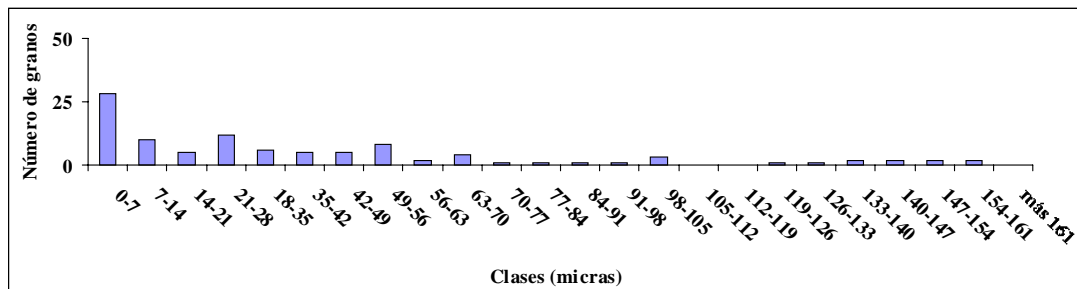


Figura 4. Frecuencia de granos de oro clasificados por rangos de tamaños. Veta Bruja.

--Áreas y contenidos

El área de los granos individuales de oro analizada (ADI) es el área observada estrictamente en una superficie, lo que supone una profundidad de detección nula. Sobre la hipótesis de que $\%A \approx \%V$ (Russ, 1990), se calculó la contribución teórica de cada granulométrica (anchura) al contenido en oro referido a 1 tonelada de material del filón en estudio. Esta contribución se expresa en fracciones granulométricas que se representan en los histogramas (figuras. 5 y 6), referidos también al % de área representado por cada fracción granulométrica de oro (eje a la izquierda).

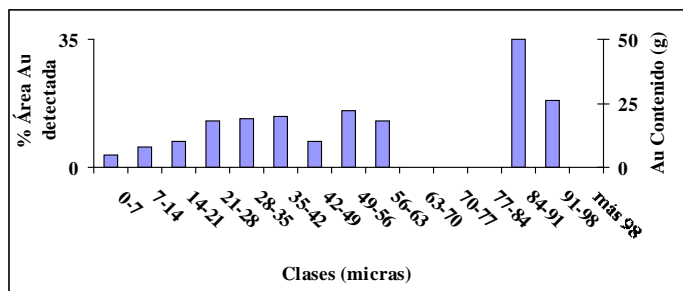


Figura 5. Contribución del contenido de oro referido a 1 t. de material, clasificado por rangos de tamaños. Veta Gruesa.

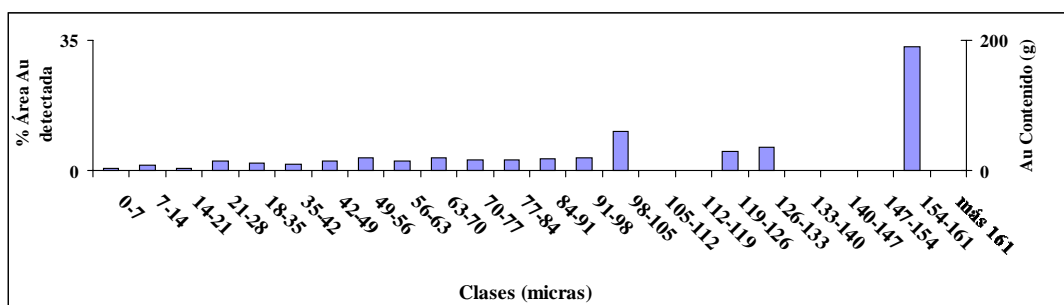


Figura 6. Contribución del contenido de oro referido a 1 t. de material, clasificado por rangos de tamaños. Veta Bruja.

--Morfología.

La coherencia de las medidas de parámetros morfológicos de los granos de Au ha sido evaluada por medio de la comparación de los parámetros anchura, longitud y diámetro equivalente de un número representativos de granos de oro de las dos vetas en conjunto. La buena correlación (por ejemplo: Figura 7) prueba la similitud en la forma de los granos de Au y su tendencia a ser semi-redondeados con cierta alineación.

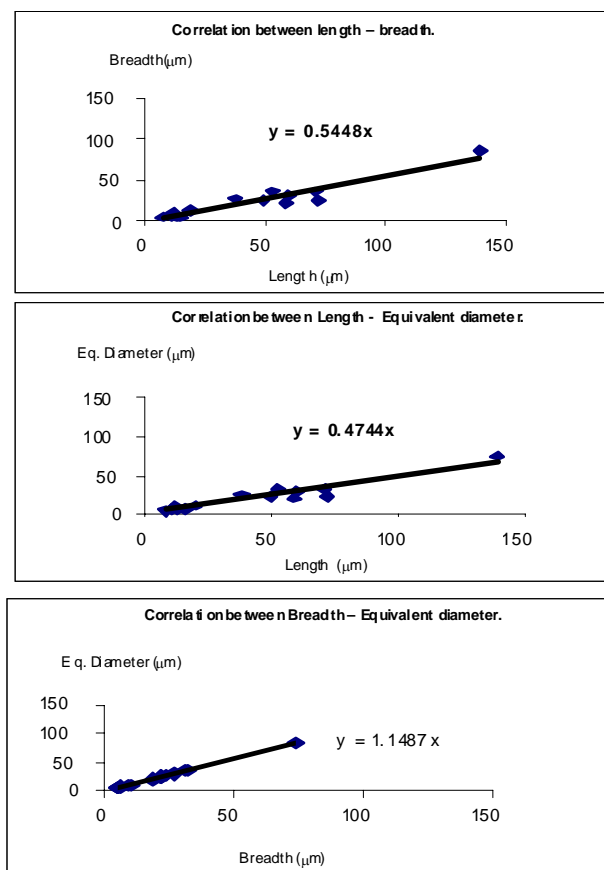


Figura 7. Correlación entre parámetros geométricos obtenidos de los granos de Au en Vetos Gruesa y Bruja.

CONCLUSIONES

ANÁLISIS DIGITAL DE IMAGEN

- Desde el punto de vista metodológico, la técnica representa una gran ventaja respecto a los métodos clásicos ya que, por su mayor **versatilidad**, **agilidad**, **sistemática** y **potencia**, permite aumentar la base de observación y automatizar el tratamiento matemático de los datos, generando resultados **más fiables y rápidos**.

Una ventaja adicional de la metodología (ADI) ensayada es que la digitalización de los datos permite ofrecer resultados cuantitativos a cualquiera de las demandas posibles de información por parte del mineralurgista (área, perímetro, tamaños de grano, superficies específicas, etc.), una vez que se ha demostrado la posibilidad de deducción mediante

funciones matemáticas verificadas experimentalmente. No obstante, sigue siendo necesario el examen previo (cualitativo) por parte de un experto microscopista para sentar los criterios de aplicación del método: por ejemplo, si las granulometrías del oro fueran muy finas, no sería fiable o representativo el estudio por microscopio óptico y habría que recurrir al microscopio electrónico.

- Desde el punto de vista de resultados, la segmentación individual de cada fase mineral mediante análisis multiespectral (Rojo, Verde y Azul), es satisfactoria siempre que **las fases mantengan una composición química constante**.

BIBLIOGRAFÍA

Berrezueta, E. 2000. *Aplicación del Análisis Digital de Imagen a la investigación tecnológica de menas auríferas*. Nariño. Colombia. Tesis de Master. E.T.S.I. de Minas. Universidad Politécnica de Madrid, 100 pp. (no publicada).

Castroviejo, R., Chacón, E., Múzquiz, C., Tarquini S. 1999 (a). A preliminary Image Analysis characterization of massive sulphide ores from the SW Iberian Pyrite Belt (Spain). *Geovision 99, Int. Symp. on Imaging Appl. in Geology*, Univ. Liège, Belgium, 37-40.

Castroviejo, R., López, A., Múzquiz, C., Pirard, E. 1999 (b). Modal Image Analysis of metallic sulphide ores from the SW Iberian Pyrite Belt (Spain). *Geovision 99, Int. Symp. on Imaging Appl. in Geology*, Univ. Liège, Belgium, 41-44.

Pantoja, F. 1999. *Optimización del proceso de amalgamación en la pequeña minería del oro: mejora de la recuperación y disminución de las pérdidas de mercurio*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Autónoma de Madrid, (no publicada).

Pirard, E., (2003). Análisis Mineralógico Cuantitativo. Seminario Internacional de Minería, Metalurgia y Medioambiente. Escuela Politécnica Nacional y Universidad católica de Lovaina. Pag 85-97.

Russ, J.C. 1990. *Computer-Assisted Microscopy. The measurement and analysis of images*. Plenum Press, New York, 450 pp.